影响柴达木盆地降水量变化的主要天气动力因素①

韩进军[1,2,3]， 王建萍[1,2]， 陈 亮[1,2]， 凌智永[1,2]， 相江芸[1,2,3]

（1. 中国科学院青海盐湖研究所，中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室，青海 西宁 810008；
2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室，青海 西宁 810008；3. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：为了解柴达木盆地内近 57 a 来降水量变化与太阳黑子、北极涛动(AO)和厄尔尼诺－南方涛动(ENSO)等因素间的关系，运用线性趋势法、Mann-Kendall 检验法和小波分析法等对盆地内 8 个气象站的降水量进行了分析。发现近 57 a 来盆地内降水量年平均增加 0.628 mm，夏季增加 0.423 mm，夏季降水占全年总增加量的 67%，年降水量存在 2～3 a 和 1 a 的显著周期。降水量与太阳黑子相对数存在近似正相关的 8～12 a 的主共振周期，降水量滞后 1.2～1.8 a。年降水量与 AO 主要存在近似正相关的 2～3 a 和 1～2 a 的共振周期。年降水量与 ENSO 存在近似负相关的 3 a 和近似正相关的 5～6 a 的共振周期。表明盆地内降水与其天气动力因素在不同的周期尺度上存在不同的相关性。

关键词：降水量；太阳黑子；北极涛动；厄尔尼诺－南方涛动；柴达木盆地

近年来，柴达木盆地降水量增加趋势显著，且夏季降水量增加尤为明显，整体气候朝着湿暖化的方向发展[1-2]。而降水量的明显增加对于盆地边缘湿地面积的增加[3]、土壤的侵蚀[4]、植被覆盖的变化[5-7]、农牧业的发展[8]、地表水资源量的增减和盆地内湖泊面积的变化，尤其是蕴含有丰富矿产资源的盐湖面积的变化[9-11]等都产生了较大的影响。

柴达木盆地的降水量变化除了主要受高原季风的影响外，还与太阳黑子活动、北极涛动(AO)和厄尔尼诺－南方涛动(ENSO)事件等都有着密切的联系[2, 12-14]。太阳黑子相对数是表示太阳活动强弱的指标，研究这一序列不仅可以认识太阳活动的变化规律，还可以研究其与降水量等的密切联系。太阳黑子的影响还具有显著的区域特性[14-15]，据研究，我国东北地区夏季降水与太阳黑子数呈显著负相关关系，而西北西部地区降水与太阳黑子数之间呈现强正相关关系[14]。AO 是北半球热带外(20°N 以北)冬季海平面气压场上最突出的模态，它能表征中纬度西风带的强度和位置，且能反映北半球中高纬度大气环流的基本状态[16]。过去几十年北半球中高纬度的气候变量很大一部分可以用 AO 的变化趋势加以解释。其中 AO 的正负位相可以表征西风气流的稳定和强弱，它是大气基本环流形势的一个最重要的依据和指标[16-17]。因此，降水量的变动与 AO 间有着很强的联系，如西北地区夏季降水变化与同期 AO 显著相关，还与春季 AO 指数具有显著的相关关系[13]。同样，ENSO 也是造成异常的一个重要原因，导致亚洲季风异常和我国旱涝发生的关键因素。ENSO 年我国东南季风偏弱，而来自南半球的越赤道西风却很强，使西太平洋热带辐合带异常活跃[18]。但根据宗海锋和方国华等的研究，多年以来厄尔尼诺事件的形成、发展及其影响范围和程度也在发生变化，例如，ENSO 与我国降水量之间的关系，尤其是夏季降水间的关系正在发生变化，且这种变化会因不同的厄尔尼诺类型和地区而有所不同[18-19]。

在以往的研究中表明，柴达木盆地气候趋于明显变湿，降水量和降水日数均呈增多趋势[2]。盆地内春、夏两季降水的增加多于秋、冬两季，其中夏季降水量增加最为明显[1]。盆地内夏季和秋季降水量增加最多的月份为 7 月，冬季和春季降水量增加最多的月份为 3 月[20]。小波分析表明，柴达木盆地的年降水量存在 5 a、8 a、20 a 和 28 a 的主周期[21]。但有关盆地降水的近期变化趋势以及盆地降水变化

① **收稿日期：**2019－05－11； **修订日期：**2019－11－04
基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFC0406605)；国家自然基金面上项目(41471454，41671521)；青海省创新平台项目(2018－ZJ－T10，2018－ZJ－T03)；第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0805)共同资助
作者简介：韩进军(1994－)，男，硕士研究生，主要从事盐湖区荒漠化研究. E-mail：hanjj215@ qq. com
通讯作者：王建萍. E-mail：jianpingwang@ isl. ac. cn

与太阳黑子、AO 和 ENSO 间的相关关系前人并未做过研究。除此之外,本文还尝试用厄尔尼诺－南方涛动指数(ONI)年累积指数与年降水量做交叉小波和小波相干分析,以期揭示盆地内降水与 ENSO 的共振周期及其相关性,以了解盆地降水的最新变化趋势及其与太阳黑子、AO 和 ENSO 间的相关关系。这对精准分析盆地降水量的变化趋势,以及受降水量影响较大的盆地生态环境的变化、盐湖资源的可持续开发利用和降水及其影响因素间的作用机制等都有一定的借鉴意义。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

柴达木盆地地处青藏高原北部,是一个封闭的内陆干旱荒漠盆地,地处 34°41′～39°20′N,87°49′～99°19′E,盆地南部为昆仑山脉,北部为祁连山脉,西部为阿尔金山脉,呈一不规则菱形山间盆地[22]。盆地海拔 2 426～6 821 m,中部地势较低,西部高于东部,年降水量少且主要集中在夏季,太阳辐射强且日照时间长,高原季风较强,西风环流较弱[2]。

1.2 数据来源

本文采用了柴达木盆地的德令哈、格尔木、都兰、诺木洪、小灶火、大柴旦、冷湖和茫崖共 8 个气象台站(图 1)1961—2017 年的月平均降水量数据,数据来源于国家气象信息中心和青海省气候中心。太阳黑子活动相对数来自 SIDC-Solar influences Data Analysis Center(http://sidc.oma.be/index.php),标准化北极涛动指数(AOI)和厄尔尼诺指数(ONI)序列来自 NOAA/CPC(美国大气海洋局气候预测中心:http://www.cpc.ncep.noaa.gov)。

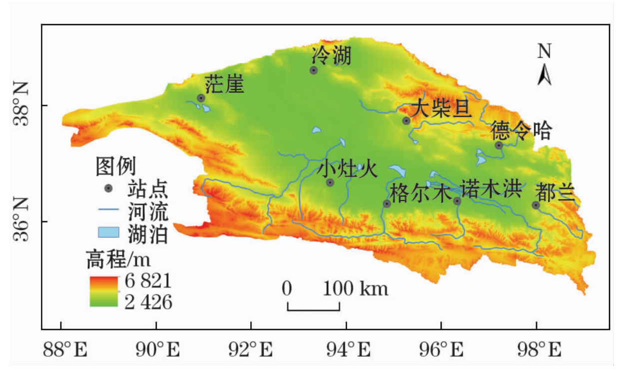


图 1 柴达木盆地气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the Qaidam basin

1.3 研究方法

本文采用的研究方法主要包括线性趋势法、距平与累积距平法、Mann-Kendall 非参数秩次相关检验法和小波分析法。

线性趋势法可以直观地反映降水量的变化趋势。

距平与累积距平法可以直观判断曲线的变化趋势,距平指某一系列数值中的某一个数值与平均值间的差,而累计距平是 n 个时刻距平的累积值[23]。

Mann-Kendall 检验是一种非参数统计方法,被广泛应用于水文气象资料的突变检验,其优势是不需要样本遵从一定的分布,却可以揭示时间序列的突变特征[24]。根据样本量构造时间序列 S_k,在时间序列随机独立的假定条件下定义统计量 UF_k,在给定的显著性水平临界值下通过信度检验可判断序列的增减趋势。同理,在逆序列中可求得统计量 UB_k,而曲线 UF_k 和曲线 UB_k 的交点就可能是其突变点[23,25]。

小波分析被广泛应用于多时间尺度变化特征的研究中,其目的是得到发生在不同时间尺度下局部和瞬态现象的完整表示[26-28]。小波分析的工具包括连续小波功率谱图、交叉小波能量谱和小波相干谱。本文运用复 Morlet 小波能量谱来显示时间尺度信号的强弱,从而识别多时间尺度演变和突变特征[29-30]。交叉小波能量谱能够反映两个序列经小波变换后的相同能量谱区域,可以揭示两序列在不同时频域上相互作用的显著性和在时频域中的位相关系。而小波相干则能够揭示交叉小波不能揭示的两者低能量区的显著相关性[30-31]。

2 结果与分析

2.1 降水的变化趋势特征

柴达木盆地多年平均降水量为 83 mm,降水极大值在 2010 年,为 141.6 mm,极小值在 1965 年,为 41.5 mm。6 阶多项式拟合曲线反映出 20 世纪 60 年代降水偏少但上升趋势明显,70 年代到 20 世纪末降水较多但增长平缓,基本在年平均 80 mm 左右,进入 21 世纪后降水量上升趋势明显,但近年来又有下降的趋势(图 2a)。总体来看,柴达木盆地近 57 a 来降水量呈较为明显的增加趋势,年平均增加 0.628 mm 左右。盆地四季的降水量也呈增加趋势,其中春季(3—5月)年均增加0.101 mm,占全年总

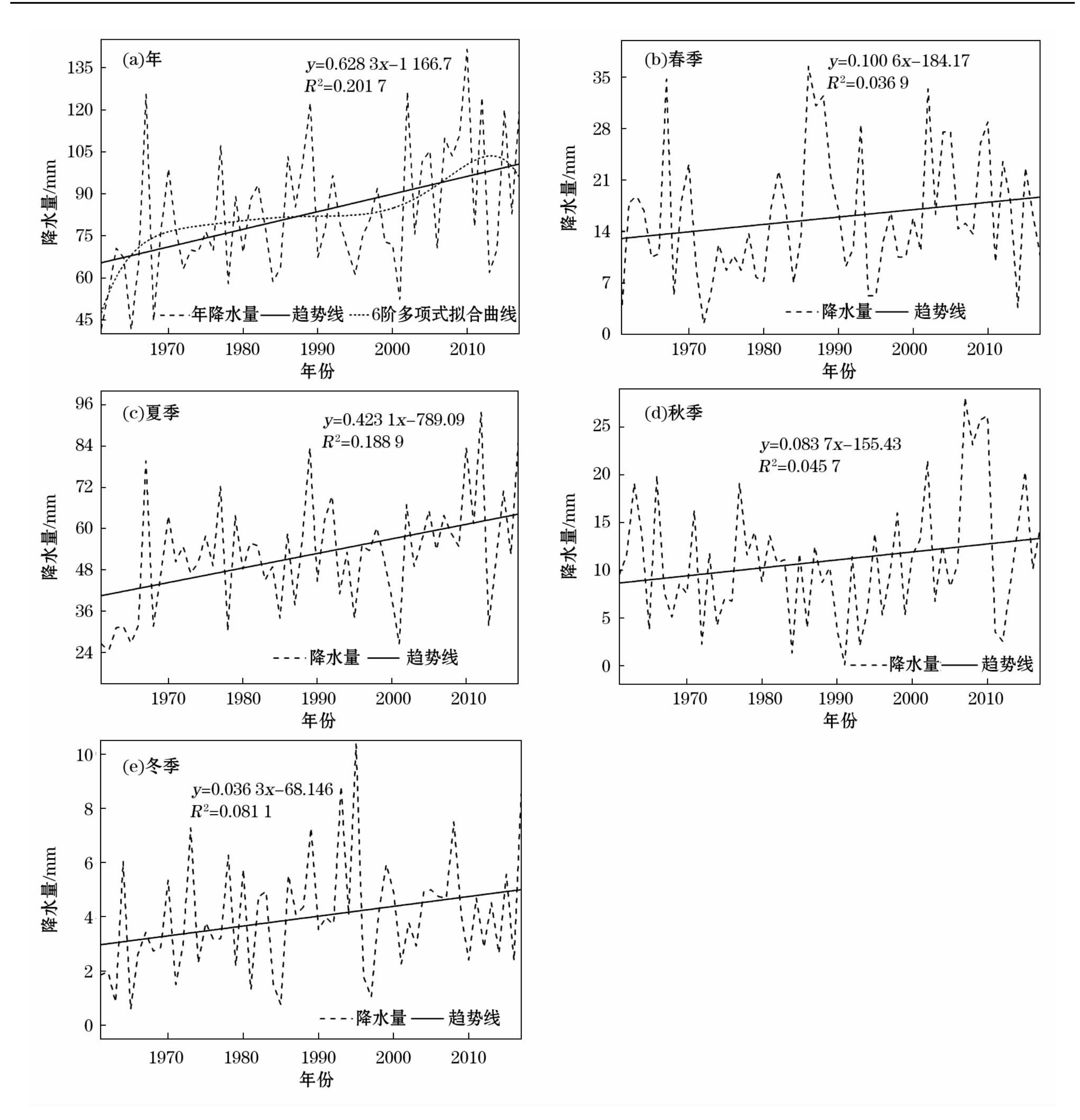


图 2 1961—2017 年降水量的变化趋势及多项式拟合曲线和四季降水量的变化趋势

Fig. 2 Change trend and polynomial fitting curve of annual precipitation from 1961 to 2017, and the change trend of precipitation in the four seasons

增加量的 16%（图 2b）；夏季（6—8 月）年均增加 0.423 mm，占全年总增加量的 67%（图 2c）；秋季（9—11 月）年均增加 0.084 mm，占全年总增加量的 13%（图 2d）；冬季（12 月至次年 2 月）年均增加 0.036 mm，占全年总增加量的 5%（图 2e），其中夏季降水量增加最为明显，春季降水量增加较多，冬季最少。

2.2 降水的突变特征

通过 Mann-Kendall 来检验降水的突变情况。分析发现 *UF* 值在 1961—2017 年一直大于 0，表明盆地内年降水量一直处于增加的趋势。*UF* 在 1987—2000 年和 2002 年后增加趋势超过了 0.05 的显著性置信区间，说明增加趋势显著。*UF* 和 *UB* 在置信区间内有 4 个交点，即 1976 年、1980 年、1983 年和 1985 年，1985 年后增加趋势较大且超出了显著性置信区间（图 3a）。而作为降水量增加最为明显的夏季，在 1962 年后 *UF* 值也一直大于 0，这表明在 1962年之后夏季降水处于增加趋势，且在

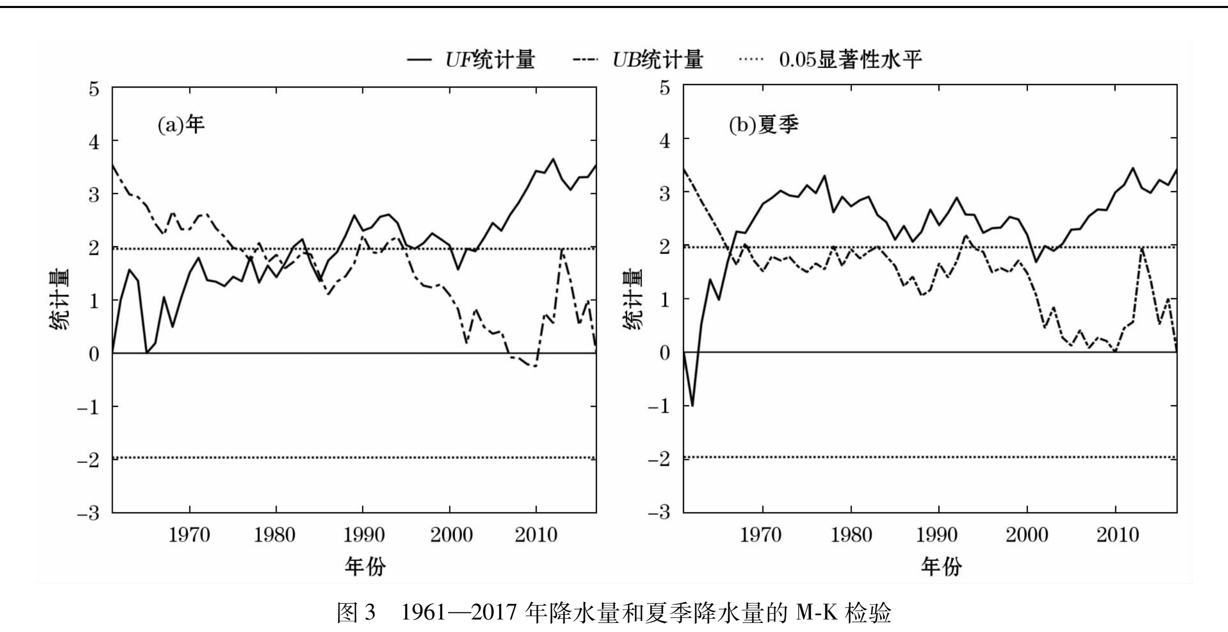


图 3 1961—2017 年降水量和夏季降水量的 M-K 检验

Fig. 3 M-K test of annual precipitation and summer precipitation from 1961 to 2017

1967 年后超过了 0.05 的显著性置信区间,上升趋势显著。夏季降水的 *UF* 和 *UB* 在置信区间相交于 1966 年,且在之后 *UF* 值超出了显著性置信区间,表明柴达木盆地夏季降水量在 1966 年存在显著的突变,此时夏季降水量存在由少到多的转变(图 3b)。

2.3 降水量与其主要影响因素的相关性

经前人研究,太阳活动可以通过黑子的数量影响大气,进而在太阳活动强烈的年份,即太阳黑子出现峰值的年份影响降水量的多少[14,32]。除此之外,研究也表明太阳黑子与热带海温变化引起的大气环流、气温和压强的变化等都有一定的相关性,而这些都会影响降水量的变化[33-34]。由降水量距平与年累积太阳黑子相对数、AOI 和 ONI 距平相对比,可以得出太阳黑子及其影响因素间的周期性变化规律。如图 4a 可知,太阳黑子相对数有显著的周期性变化,存在 5 个上升期和 5 个下降期,上升期对应的极大值年分别为 1968 年、1979 年、1989 年、2000 年、2014 年,下降期对应的极小值年分别为 1964 年、1976 年、1986 年、1996 年和 2008 年。与此同时,1961—2017 年降水量距平出现了 5 个上升期和 6 个下降期,对应的 5 个极大值年分别是 1967 年、1977 年、1989 年、1998 年、2010 年,对应的 6 个极小值年分别为 1961 年、1968 年、1984 年、1995 年、2001 年、2014 年。可以看出,降水量距平极大值滞后太阳黑子极小值 0~3 a,降水量距平极小值除在 1984 年和 1995 年滞后太阳黑子极大值 5~6 a 外,其他年份均滞后 0~1 a。说明盆地内降水量随着太阳黑子的增加而减少,两者存在负相关关系。

AO 可以表征与我国降水量密切相关的西风气流的稳定和强弱[16-17],而 AO 的变化可以用 AOI 来体现。1961—2017 年北极涛动指数(AOI)波动性较强,AOI 的年累积最大值出现在 1990 年,最小值则出现在 2010 年,总体上 1990 年前 AOI 指数负值较多,而在此之后正值则明显增多。盆地内降水量与 AOI 相关性较为复杂,在 1967 年、1982 年、1986 年、2007 年和 2015 年 AOI 极大值对应降水量极大值,而在 1977 年、1998 年、2005 年和 2010 年 AOI 极大值对应降水量极小值(图 4b)。

海洋尼诺指数(ONI)是对厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)事件的一种测量方法,它是通过检测厄尔尼诺事件最为突出的 3.4 区域(5°N~5°S,120°~170°W)的海温低于或高于正常海表温度的时段,在至少连续 5 个月大于 0.5 时,表明发生了一次厄尔尼诺事件[35-36]。ENSO 可以通过"遥相关"的形式影响东亚季风系统的每个成员,而中国位于东亚季风区,因此 ENSO 可以间接影响中国的气候异常,进而影响我国的降水量变化[37-39]。57 a 来 ONI 指数波动较大,其年累积指数在 2015 年达到最大,且月值指数均大于 0.5,表明 2015 年发生了近 57 a 来最大的一次厄尔尼诺事件。除此之外,年累积 ONI 大于 5 表明发生厄尔尼诺事件较强的年份还有 1963 年、1965 年、1969 年、1972 年、1982—1983 年、1987 年、1991—1992 年、1997 年和 2002 年。年降水量与 ONI的相关关系较为复杂,如在厄尔尼诺事件较强

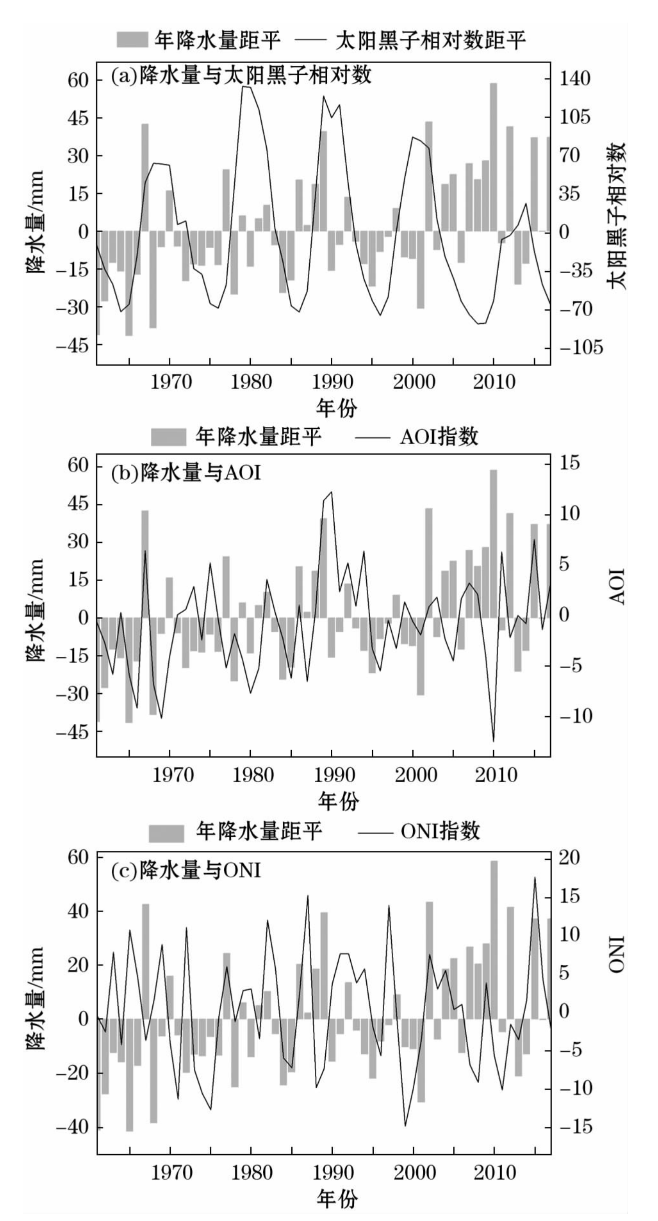


图 4　年降水量距平与太阳黑子相对数距平、AOI 指数和 ONI 指数间的变化序列

Fig. 4　Change squence of the annual precipitation anomaly with the relative number anomaly of sunspots, the Arctic Oscillation index and the El Niño index

的 1992 年、2002 年和 2015 年份降水量也较大，而 1965 年和 1972 年降水量却较少(图 4c)。

2.4　降水量及其主要影响因素的连续小波分析

连续小波谱能够反映信号自身的时间尺度变换特征[30]。本文通过连续小波变换对盆地降水量、太阳黑子相对数、AOI 和 ONI 年值进行周期特征分析(图 5)。

从图 5 可以看出在 95% 的置信度下：① 柴达木盆地的降水量存在 2 个周期，分别为 2～3 a(1965—1970 年)、1 a(2009—2014 年)的周期(图 5a)。② 太阳黑子相对数存在 1 个周期，为 8～13 a(1962—2012 年)的周期(图 5b)，这与前人的研究结果相似[40-42]。③ AOI 存在 2 个周期，分别为 2～3 a(1964—1968 年)、16 a(1980—1987 年)的周期(图 5c)，这与胡跃文等的研究结果相一致[43]。④ ONI 存在两个周期，分别为 3 a(1968—1974 年)、3～5 a(1983—1998 年)的周期(图 5d)。

综上所述，盆地内的降水量、太阳黑子相对数、AO 和 ENSO 均存在着显著的、不同尺度的周期。其中太阳黑子相对数 8～13 a 的周期显著性最高，且周期尺度范围较大。ENSO 3～5 a 的周期显著性较高，其周期尺度范围也较大。盆地内降水量和 AOI 在 1965—1968 年，2～3 a 周期尺度上高能量区表现出比较好的相似性，说明降水量和 AO 存在时频域相关。同样，ONI 指数 3 a 尺度上的显著周期也与盆地内降水量 2～3 a 尺度上的高能量区表现出一定的相似性，说明降水量和 ENSO 也存在一定的时频域相关。与上述相同的是盆地内的降水量 1 a 的周期显著性也较高，但其周期尺度范围较小。

2.5　降水量与其主要影响因素的交叉小波分析

2.5.1　降水量与太阳黑子相对数　为了分析太阳黑子相对数的变化对柴达木盆地降水量的影响及二者在时频域中的相互关系，本文对二者进行了交叉小波和小波相干分析(图 6)。

交叉小波能量谱显示降水量与太阳黑子相对数存在 8～12 a(1964—1998 年)的共振周期，位相差表明降水量与太阳黑子相对数的变化表现为近似正相关(图 6a)。小波相干能量谱显示降水量与太阳黑子相对数在 1966—1996 年，8～12 a 的共振周期上呈现正相关，降水量位相滞后太阳黑子相对数约 55°(1.2～1.8 a)，且这种位相变化是相对稳定的(图 6b)。从小波相干能量谱显示两者还存在共振周期为 6 a(2000—2017 年)、3 a(1961—1968 年)和 1～2 a(1984—1993 年、1996—2000 年)的尺度范围较小的周期，其中 6 a 共振周期的相位差呈现负相关，3 a 共振周期的相位差呈现正相关，而 1～2 a 共振周期的相位差在 1993 年由近似正相关转变为正相关，即在 1993 年发生了突变。

2.5.2　降水量与 AOI　交叉小波能量谱显示，降水量与 AOI 存在 2 个共振周期(图 7a)，分别为：① 2～3 a(1964—1969 年)的主共振周期，位相差表明降水量与 AOI 的变化表现为近似正相关，二者位相差的变化不太稳定。② 1 a(2007—2010年)的共振

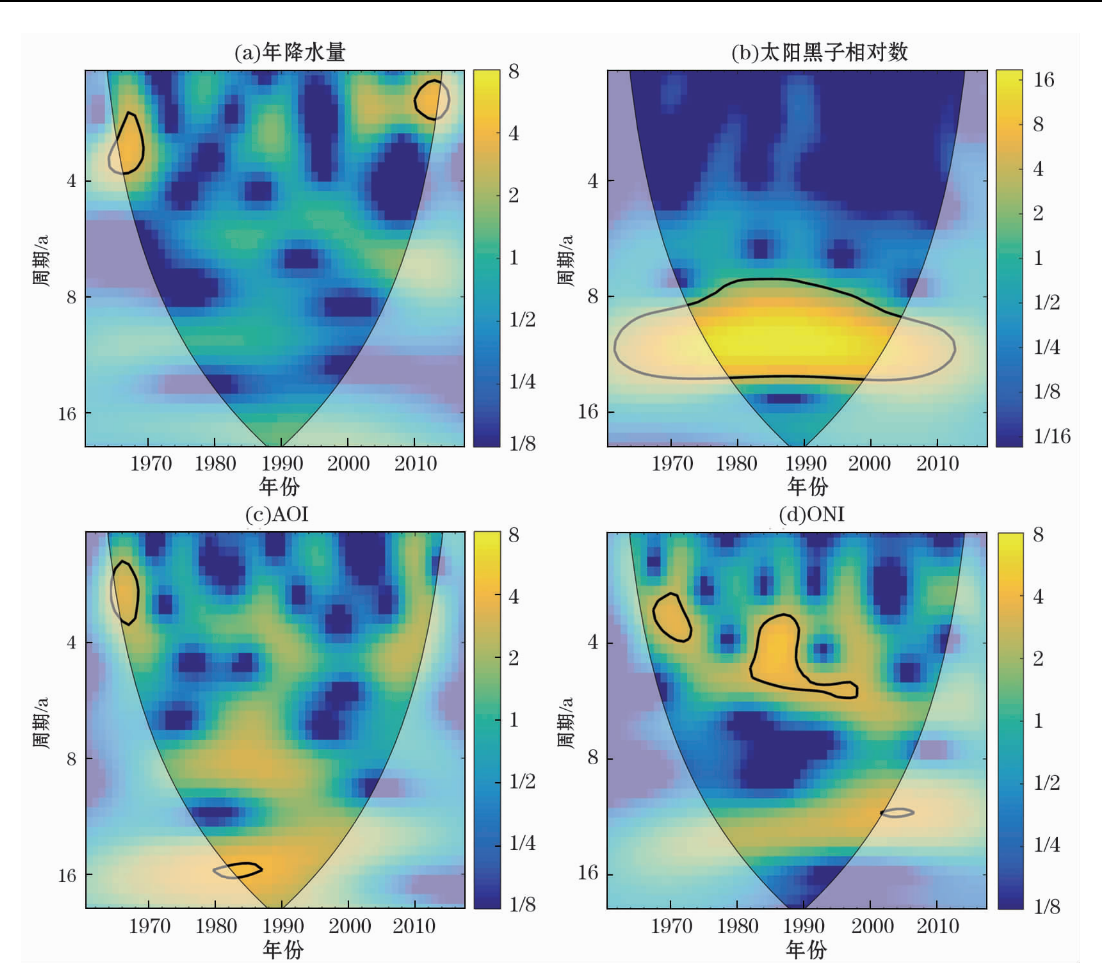


图 5 柴达木盆地年平均降水量和主要天气动力因素的 Morlet 连续小波功率谱图

(粗黑线为 95% 置信区间的边界,细曲线为小波影响锥(COI)[40]。)

Fig. 5 Continuous Morlet wavelet power of mean annual precipitation and major weather dynamic factors in the Qaidam Basin

(Black bold line is the border of 95% confidence level and the thin curve is cone of influence[40])

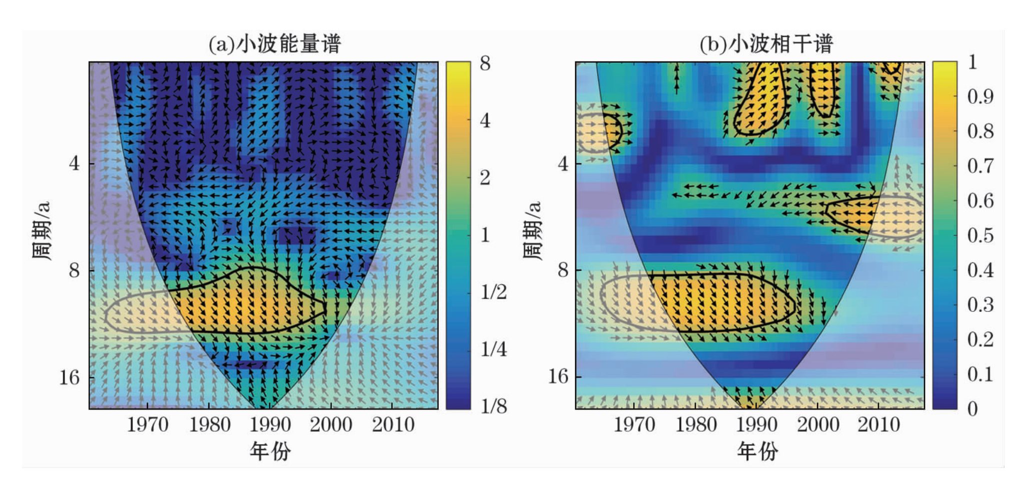


图 6 降水量与太阳黑子数的交叉小波能量谱和小波相干谱

(黑粗线是 95% 置信区间的边界,细曲线是小波影响锥(COI),箭头表示相对位相差,→表示两者变化位相一致,

←表示两者变化位相相反,↑/↓表示降水量位相超前/滞后动力因素 90°[40]。下同。)

Fig. 6 Cross wavelet transform and wavelet coherence between the annual precipitation and the relative sunspot number

(The black bold line is shown as the border of 95% confidence level; the thin curve indicates the cone of influence; the relative phase relationship is shown as arrows with in-phase pointing right and anti-phase pointing left; up and down arrows indicate that the phase of precipitation is leading or lagging the dynamic factor 90°[40])

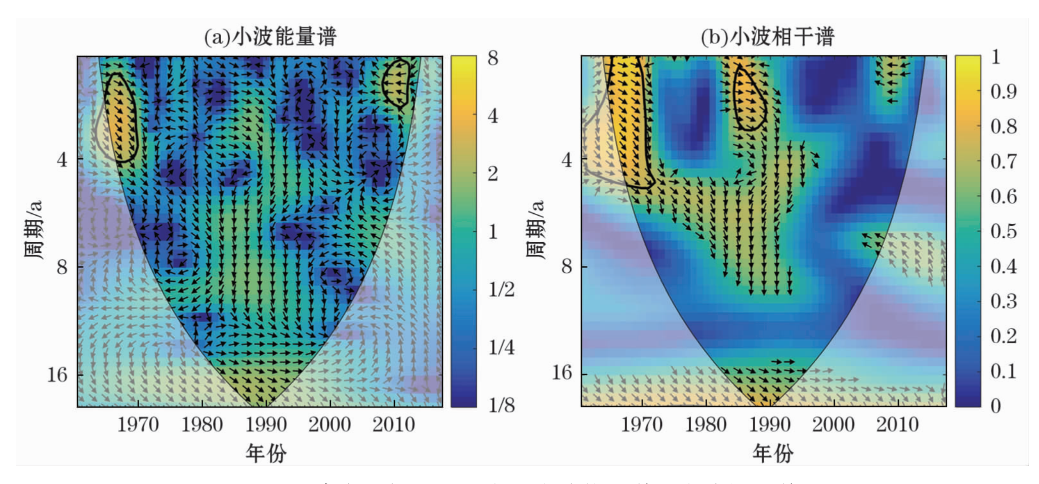


图 7 降水量与 AOI 的交叉小波能量谱和小波相干谱

Fig. 7 Cross wavelet transform and wavelet coherence between precipitation and the Arctic Oscillation index

周期,位相差表明降水量与 AOI 的变化表现为负相关。小波相干能量谱显示降水量与 AOI 存在 2 个共振周期(图 7b),分别为:① 1 ~4 a(1961—1970 年)的共振周期,位相差表明降水量与 AOI 的变化表现为近似正相关,二者位相差的变化也不太稳定。② 1 ~2 a(1984—1989 年)的共振周期,位相差表明降水量与 AOI 的变化表现为近似正相关。

2.5.3 降水量与 ENSO 依据美国大气海洋局气候预测中心给出的 ONI 指数,在至少连续 5 个月大于 0.5 时才能表明发生了一次厄尔尼诺事件,说明利用 ONI 指数计算降水量与 ENSO 的位相差时,ONI 指数的位相需至少推迟 0.4 a 才可表示厄尔尼诺的位相,因此笔者计算降水量与 ENSO 间的位相差统一将 ONI 的位相推迟 0.4 a。而降水量与 ONI 的共振周期和相关性及降水量与 ENSO 的共振周期和相关性一致,只是因 ENSO 开始的时间因延迟 0.4 a而使共振的周期尺度范围略有减小。

交叉小波能量谱显示,降水量与 ONI 存在 2 个共振周期(图 8a),分别为:① 3 a(1965—1971 年)的共振周期,位相差表明降水量与 ONI 的变化表现为近似负相关,说明降雨量与 ENSO 在 3 a 左右的共振周期上呈现近似负相关。但降水量与 ONI 的位相差变化不太稳定。② 1.5 a(2010—2013 年)的共振周期,位相差表明降水量与 ONI 的变化表现为正相关,说明降水量与 ENSO 在 1.5 a 的共振周期上表现为近似正相关。小波相干能量谱显示降水量与 ONI 存在 2 个共振周期(图 8b),分别为:① 相关系数超过 0.8 且周期尺度较大的 5 ~6 a(1991—2017 年)的共振周期,位相差表明降水量与 ONI 的变化表现为近似正相关,说明降水量与 ENSO 在5 ~6 a 的共振周期上呈现为近似正相关。降水量与 ONI 的位相差变化较为稳定,且降水量位相超前 ONI 约 20°(0.27 ~0.33 a),说明降水量滞后 ENSO 至少0.07 a。②3 a(1965—1968年)的共振周期,

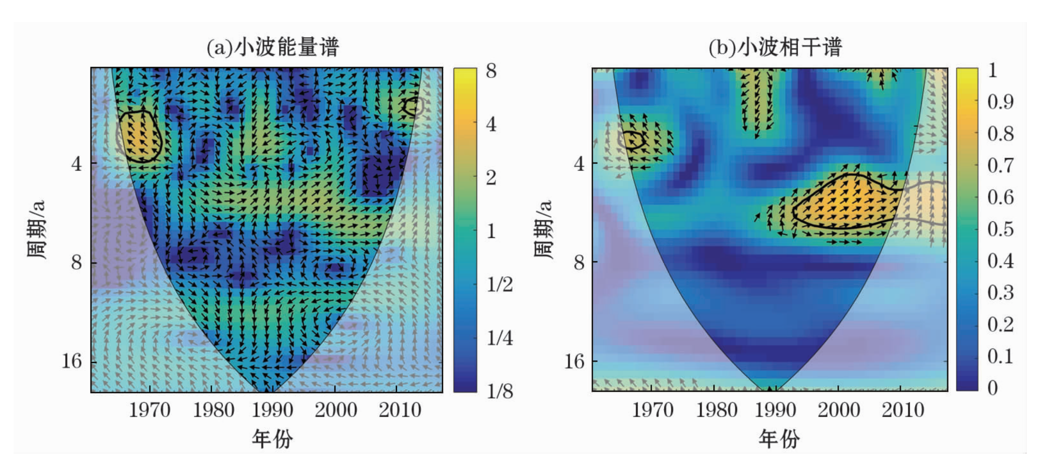


图 8 降水量与 ONI 的交叉小波能量谱和小波相干谱

Fig. 8 Cross wavelet transform and wavelet coherence between precipitation and the El Niño index

位相差表明降水量与 ONI 的变化表现为近似负相关,说明降水量与 ENSO 在 3 a 的共振周期上表现为近似负相关。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 近 57 a 来,柴达木降水量增加趋势显著,年均增加 0.628 mm,夏季年均增加最为明显,为 0.423 mm,占全年总增加量的 67%,且在 1966 年存在显著的突变,表明夏季降水在 1966 年存在由少到多的转变。柴达木盆地的降水量存在显著的 2~3 a 和 1 a 的周期,ENSO 存在显著的 3 a 和 3~5 a 的周期。降水量和 AO 在 2~3 a 周期尺度上表现出较好的相似性,说明盆地降水量和 AO 存在时频域相关。

(2) 降水量与太阳黑子相对数在 8~12 a 的共振周期内存在近似正相关,降水量滞后太阳黑子相对数 1.2~1.8 a,且位相变化相对稳定。两者在低能量区还存在负相关的 6 a 共振周期、正相关的 3 a 和 1~2 a 的共振周期。

(3) 降水量与 AO 的周期相关性较为复杂,但以正相关为主。降水量与 AO 在 2~3 a 的共振周期内呈现近似正相关,低能量区还存在 1~2 a 的共振周期,且二者也呈近似正相关。还存在尺度范围较小且呈现弱负相关的 1 a 共振周期。

(4) 降水量与 ENSO 在 3 a 的共振周期内呈现近似负相关。在 5~6 a 的共振周期内呈现近似正相关,降水量滞后 ENSO 至少 0.07 a,且位相变化较为稳定。两者还存在 1.5 a 的共振周期,但其尺度范围较小且呈现弱正相关。

3.2 讨论

由上述研究可知,盆地内降水量与太阳黑子数、北极涛动和厄尔尼诺间均存在显著的相关关系,说明各因素对该地区降水量的变化有一定的影响。但各因素与盆地内降水量间的相关性不仅仅是简单的正相关或者负相关,它们在不同的共振周期内表现为不同的正相关或负相关。可见,太阳黑子数、北极涛动和厄尔尼诺等因素对盆地降水量变化的影响机制十分复杂。如太阳黑子相对数的变化包含多种周期分量,且许多周期分量的周期值大小和能量的强度都具有时变的特征[41],这使得研究太阳黑子数变化与降水量的变化较为复杂。除此之外,由于影响气候系统的因素复杂多样,太阳活动对降水造成的影响也表现出复杂多样的变化,因此降水与太阳黑子变化并不完全对应[23]。还有研究表明,在夏季北极涛动偏强的年代,西北绝大部分区域年降水比较分散[44]。AO 与中国夏季降水异常间存在显著的时滞相关,如冬春季由于 AO 造成的地面下边界条件的异常,可以有较长的记忆并对数月之后的东亚降水产生异常[45-46]。ENSO 由于其强度、出现的时间和地点以及发展阶段的不同而存在较大差异,且会有其他影响因子的干扰[47-49]。因此,上述因素就决定了研究降水量与太阳黑子数、AO 和 ENSO 间的复杂性。且上述因素只是影响盆地内降水量变化的众多影响因素中的 3 个,降水受自然环境和人类活动等因素影响,其影响因素也呈现复杂多样[2]。气候的变化及其产生机理的复杂性,决定了盆地内降水及其影响因素研究的复杂性,本文仅对盆地内降水量的变化与 3 个影响因素间的关系进行了初步分析,后续还需进一步研究。

参考文献(References):

[1] 李燕,金永明,孙永寿. 柴达木盆地近 55 a 降水量变化趋势的时空特征[J]. 人民黄河,2013,35(9):48-50. [Li Yan,Jin Yongming,Sun Yongshou. Spatial-temporal characteristics of change trend of precipitation in the Qaidam Basin during the past 55 years[J]. Yellow River,2013,35(9):48-50.]

[2] 李林,申红艳,李红梅,等. 柴达木盆地气候变化的区域显著性及其成因研究[J]. 自然资源学报,2015,30(4):641-650. [Li Lin,Shen Hongyan,Li Hongmei,et al. Regional differences of climate change in Qaidam Basin and its contributing factors[J]. Journal of Natural Resources,2015,30(4):641-650.]

[3] 张继承,姜琦刚,李远华,等. 近 50 年来柴达木盆地湿地变迁及其气候背景分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2007(4):752-758. [Zhang Jicheng,Jiang Qigang,Li Yuanhua,et al. Changes of wetland in Qaidam Basin in the past 50 years and analysis of climatic background[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2007(4):752-758.]

[4] 吴成永,陈克龙,曹广超,等. 近 30 年来青海省风蚀气候侵蚀力时空差异及驱动力分析[J]. 地理研究,2018,37(4):717-730. [Wu Chengyong, Chen Kelong, Cao Guangchao, et al. The spatial and temporal differences and driving forces of wind erosion climatic erosivity in Qinghai province from 1984 to 2013[J]. Geographical Research,2018,37(4):717-730.]

[5] 夏薇. 柴达木盆地植被覆盖的动态变化研究[D]. 北京:中国地质大学,2013. [Xia Wei. Dynamic Change of Vegetation Cover in the Qaidam Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences,2013.]

[6] Fu Y,Chen H,Niu H,et al. Spatial and temporal variation of vege-

tation phenology and its response to climate changes in Qaidam Basin from 2000 to 2015[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018,28(4):400 – 414.

[7] 王林林,刘普幸,王允. 近 14 年来柴达木盆地 NDVI 时空变化及其影响因素[J]. 生态学杂志,2015,34(6):1713 – 1722. [Wang Linlin, Liu Puxin, WangYun. Spatial and temporal variations of NDVI and its influencing factors in Qaidam Basin in the last 14 years[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(6): 1713 – 1722.]

[8] 曾永丰. 柴达木盆地环境演化与绿洲农牧业变迁初步研究—以诺木洪绿洲为例[J]. 中国沙漠,2003,23(3):125 – 127. [Zeng Yongfeng. Relationship between environmental evolution and oasis agriculture and animal husbandry in Qidam Basin: A case study in Nuomuhong oasis[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(3):125 – 127.]

[9] 傅小城,王芳,王浩,等. 柴达木盆地气温降水的长序列变化及与水资源关系[J]. 资源科学,2011,33(3):408 – 415. [Fu Xiaocheng, Wang Fang, Wang Hao, et al. Analysis of long-term changes in temperature and precipitation and their relationships with water resources in the Qaidam Basin in China[J]. Resources Science, 2011, 33(3):408 – 415.]

[10] 吴娟娟. 近 20 年柴达木盆地主要盐湖湖水面积变化及原因分析[D]. 青海:中国科学院研究生院(青海盐湖研究所),2014. [Wu Juanjuan. Analysis on the Changing and Reason of the Salt Lake Surface Water Area in the Qaidam Basin Since Recent 20 Years[D]. Qinghai: Chinese Academy of Sciences(Qinghai Institute of Salt Lakes), 2014.]

[11] 段水强. 1976—2015 年柴达木盆地湖泊演变及其对气候变化和人类活动的响应[J]. 湖泊科学,2018,30(1):256 – 265. [Duan Shuiqiang. Lake evolution in the Qaidam Basin during 1976 – 2015 and their changes in response to climate and anthropogenic factors[J]. Journal of Lake Science, 2018, 30(1):256 – 265.]

[12] 袁林旺,刘泽纯,陈晔. 柴达木盆地自然伽玛曲线记录的古气候变化对太阳辐射响应关系的对比研究[J]. 冰川冻土,2004,26(3):298 – 304. [Yuan Linwang, Liu Zechun, Chen Ye. Paleoclimatic change derived from natural gamma-logging curve in Qaidam Basin and its relation to the solar insolation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(3):298 – 304.]

[13] 郭渠,孙卫国,程炳岩,等. 我国西北地区气候变化与北极涛动的交叉小波分析[J]. 南京气象学院学报,2008,31(6):811 – 818. [Guo Qu, Sun Weiguo, Chen Bingyan, et al. Cross wavelet analysis of the arctic oscillation and climate change in Northwest China[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2008, 31(6):811 – 818.]

[14] 李慧芳. 太阳黑子活动与我国不同区域气候变化相关关系研究[D]. 西安:陕西师范大学,2016. [Li Huifang. Study on the Correlation between Sunspot Activity and Climate Change in Different Regions of China[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2016.]

[15] 王涛,霍彦峰,罗艳. 近 300 a 来天山中西部降水与太阳活动的小波分析[J]. 干旱区研究,2016,33(4):708 – 717. [Wang Tao, Huo Yanfeng, Luo Yan. Precipitation and sunspots in the central-west Tianshan Mountains in recent 300 years[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(4):708 – 717.]

[16] Thompson D, Wallace J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(9):1297 – 1300.

[17] Li J P, Wang J. A modified zonal index and its physical sense[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(12):163212.

[18] 宗海锋,陈烈庭,张庆云. ENSO 与中国夏季降水年际变化关系的不稳定性特征[J]. 大气科学,2010,34(1):184 – 192. [Zong Haifeng, Chen Lieting, Zhang Qingyun. The instability of the interannual relationship between ENSO and the summer rainfall in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(1): 184 – 192.]

[19] 方国华,丁紫玉,闻昕,等. 厄尔尼诺事件及其对我国夏季降水量时空分布的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(6):481 – 488. [Fang Guohua, Ding Ziyu, Wen Xin, et al. El Nino event and its impact on the spatial and temporal distribution of summer precipitation in China[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences Edition), 2017, 45(6):481 – 488.]

[20] 任朝霞,杨达源. 近 50 a 西北干旱区降水量变化差异分析[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(6):114 – 118. [Ren Chaoxia, Yang Dayuan. Diversity analysis on precipitation variation in the arid region of northwest China in resent 50 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(6):114 – 118.]

[21] 冯天梅,张鑫,景亚平. 近 46 年柴达木盆地气候变化的多时间尺度分析[J]. 灌溉排水学报,2014,33(1):74 – 78. [Feng Tianmei, Zhang Xin, Jing Yanping. Multi-time scale analysis of climate variation in Qaidam Basin in recent 46 years[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(1):74 – 78.]

[22] 张娟,肖宏斌,徐维新,等. 1971—2010 年柴达木盆地可降水量变化特征及其与气象条件分析[J]. 资源科学,2013,35(11): 2289 – 2297. [Zhang Juan, Xiao Hongbing, Xu Weixin, et al. Precipitable water variation and its impact factors in recent 40 years in Qaidam Basin[J]. Resources Science, 2013, 35(11): 2289 – 2297.]

[23] 曹永强,刘佳佳,高璐. 近 54 年来辽西北地区降水与太阳黑子关系研究[J]. 地理科学,2015,35(8):1027 – 1032. [Cao Yongqiang, Liu Jiajia, Gao Lu. Relationship between sunspots and precipitation in northwestern Liaoning in recent 54 years[J]. Scientla Geographica Sinica, 2015, 35(8):1027 – 1032.]

[24] 张蓓蓓,王朋,张辉,等. 近 63 a 安康地区降水与太阳黑子活动的相关性分析[J]. 干旱区研究,2018,35(6):1336 – 1343. [Zhang Beibei, Wang Peng, Zhang Hui, et al. Correlation between sunspot activity and precipitation in the Ankang region in recent 63 years[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(6):1336 – 1343.]

[25] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学,1992,16(4):482 – 493. [Fu Congbing, Wang Qiang. The definition and detection of the abrupt climatic change[J]. Scientla At-

mospherica Sinica,1992,16(4):482－493.]

[26] 王文圣,丁晶,李跃清.水文小波分析[M].北京:化学工业出版社,2005.[Wang Wensheng,Dingjing,Li Yaoqing. Hydrological Wavelet Analysis[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2005.]

[27] 孙卫国,程炳岩.交叉小波变换在区域气候分析中的应用[J].应用气象学报,2008,19(4):479－487.[Sun Weiguo,Cheng Bingyan. Application of cross wavelet transformation to analysis on regional climate variations[J]. Journal of Applied Meteorological Science,2008,19(4):479－487.]

[28] 刘志方,刘友存,郝永红,等.黑河出山径流过程与气象要素多尺度交叉小波分析[J].干旱区地理,2014,37(6):1137－1146.[Liu Zhifang,Liu Youcun,Hao Yonghong,et al. Multi-time scale cross-wavelet transformation between runoff and climate factors in the upstream of Heihe River[J]. Arid Land Geography,2014,37(6):1137－1146.]

[29] 李占玲,徐宗学.黑河上游山区径流变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2012,26(9):51－56.[Li Zhanling,Xu Zongxue. Characteristics of runoff time series for the upper reaches of Heihe River basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2012,26(9):51－56.]

[30] Torrence C,Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,1998,79(1):61－78.

[31] Maraun D,Kurths J. Cross wavelet analysis:significance testing and pitfalls[J]. Nonlinear Processes in Geophysics,2004,11(4):505－514.

[32] 赵亮,王劲松.106年来太阳黑子数与全球夏季风降水的统计关系[C]// 中国气象学会副热带气象委员会.第五届副热带气象学术业务研讨会论文摘要汇编.2009:25－30.[Zhao Liang,Wang Jinsong. Statistical Relationship between the Number of Sunspots and Global Summer Monsoon Precipitation in 106 Years[C]// Subtropical Meteorological Committee of China Meteorological Society. Summary of the Abstract of the 5th Sub-Tropical Meteorological Academic Business Seminar. 2009:25－30.]

[33] White W B,Lean J,Cayan D R,et al. Response of global upper ocean temperature to changing solar irradiance[J]. Journal of Geophysical Research,1997,102(C2):3255－3266.

[34] Alvarez Pomares O,Pérez Doval J,Cárdenas Pérez P A,et al. Solar variability manifestation on Earth-climate parameters registered at a tropical location[J]. Highlights of Astronomy,2002,12:390－391.

[35] 任福民,郭艳君,周琴芳,等.小波变换及其对厄尔尼诺研究的初步应用[J].数理统计与管理,1998,17(3):22－26.[Ren Fumin,Guo Yanjun,Zhou Qinfang,et al. Wavelet transform and its preliminary application in EL NINO study[J]. Journal of Applied Statistics and Management,1998,17(3):22－26.]

[36] 许武成,王文,马劲松,等.1951—2007年的ENSO事件及其特征值[J].自然灾害学报,2009,18(4):18－24.[Xu Wucheng,Wang Wen,Ma Jinsong,et al. ENSO events during 1951－2007 and their characteristic indices[J]. Journal of Natural Disasters,2009,18(4):18－24.]

[37] 姚辉,李栋梁.厄尔尼诺事件与中国降水及历史旱涝[J].应用气象学报,1992,3(2):228－234.[Yao Hui,Li Dongliang. The relationship between El Nino events and the rainfall,historical drought and waterlogging in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science,1992,3(2):228－234.]

[38] 袁媛,杨辉,李崇银.不同分布型厄尔尼诺事件及对中国次年夏季降水的可能影响[J].气象学报,2012,70(3):467－478.[Yuan Yuan,Yang Hui,Li Chongyin. Study of El Nino events of different types and their potential impact on the following summer precipitation in China[J]. Acta Meteorologica Sinica,2012,70(3):467－478.]

[39] Huang R H,Wu Y F. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism[J]. Advances in Atmospheric Sciences,1989,6(1):21－32.

[40] Grinsted A,Moore J C,Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series[J]. Nonlinear Processes in Geophysics,2004,11(5－6):561－566.

[41] 韩延本,韩永刚.太阳黑子相对数变化的小波分析[J].科学通报,2001,46(24):2031－2035.[Han Yanben,Han Yonggang. Wavelet analysis of relative number change of sunspots[J]. Chinese Science Bulletin,2001,46(24):2031－2035.]

[42] 张仲荣.太阳黑子和SOI对黄河上游径流的影响[D].兰州:兰州大学,2008.[Zhang Zhongrong. Effects of Sunspots and SOI on Runoff in the Upper Yellow River[D]. Lanzhou :Lanzhou University,2008.]

[43] 胡跃文,杨小怡.北极涛动与北大西洋涛动的低频变化特征[J].气象科学,2007,27(3):316－322.[Hu Yuewen,Yang Xiaoyi. Low-frequency variability of AO and NAO[J]. Journal of the Meteorological Sciences,2007,27(3):316－322.]

[44] 杨金虎,王鹏祥,白虎志,等.中国西北降水年内非均匀性特征分析[J].气候变化研究进展,2007,3(5):276－281.[Yang Jinhu,Wang Pengxiang,Bai Huzhi,et al. Intra-annual inhomogeneity characteristics of precipitation over northwest China[J]. Climate Change Research,2007,3(5):276－281.]

[45] 龚道溢,朱锦红,王绍武.长江流域夏季降水与前期北极涛动的显著相关[J].科学通报,2002,47(7):546－549.[Gong Daoyi,Zhu Jinhong,Wang Shaowu. The summer precipitation in the Yangtze River basin is significantly correlated with the early Arctic Oscillation[J]. Chinese Science Bulletin,2002,47(7):546－549.]

[46] 覃军.北极涛动年际、年代际变化特征的诊断研究[D].南京:南京信息工程大学,2005.[Qin Jun. Diagnostic Study on Interannual and Decadal Variation Characteristics of Arctic Oscillation[D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science and Technology,2005.]

[47] 刘永强,丁一汇.ENSO事件对我国季节降水和温度的影响[J].大气科学,1995,19(2):200－208.[Liu Yongqiang,Ding Yihui. Reappraisal of the influence of ENSO events on seasonal precipitation and temperature in China[J]. Scientla Atmospherica Sinica,1995,19(2):200－208.]

[48] 袁良,何金海. 两类 ENSO 对我国华南地区冬季降水的不同影响[J]. 干旱气象,2013,31(1):24 – 31. [Yuan Liang, He Jinhai. Different impacts of two types of ENSO on winter rainfall over south China[J]. Journal of Arid Meteorology,2013,31(1):24 – 31.]

[49] 李海燕,张文君,何金海. ENSO 及其组合模态对中国东部各季节降水的影响[J]. 气象学报,2016,74(3):322 – 334. [Li Haiyan, Zhang Wenjun, He Jinhai. Influences of ENSO and its combination mode on seasonal precipitation over eastern China [J]. Acta Meteorologica Sinica,2016,74(3):322 – 334.]

The main weather dynamic factors affecting precipitation change in the Qaidam Basin

HAN Jin-jun[1,2,3]; WANG Jian-ping[1,2]; CHEN Liang[1,2]; LING Zhi-yong[1,2]; XIANG Jiang-yun[1,2,3]

(1. *Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources*, *Qinghai Institute of Salt Lakes*, *CAS*, *Xining* 810008, *Qinghai*, *China*;

2. *Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lake*, *Xining* 810008, *Qinghai*, *China*;

3. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: To study the trends in precipitation and their relations with sunspots, the Arctic Oscillation (AO), and the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) in the Qaidam Basin in the previous 57 years, the linear trend method, anomaly analysis, Mann-Kendall test, and wavelet analysis method were used. The precipitation data were obtained from 8 meteorological stations located in the basin. The results showed that the mean annual precipitation in the basin increased by 0.628 mm and by 0.423 mm in the summer during the previous 57 years. The summer precipitation accounted for 67% of the total annual increase, and the mean annual precipitation exhibited significant variation periods of 2 – 3 years and 1 year. A significant approximately in-phase resonance oscillation of 8 – 12 years could be observed between the annual precipitation and the sunspot number, with the precipitation lagging by 1.2 – 1.8 years. The mean annual precipitation and AO existed in approximately in-phase resonance oscillations of 2 – 3 years and 1 – 2 years. The mean annual precipitation was inversely related to the ENSO during a 3 year resonant period and was almost positively related to the ENSO in a 5 – 6 year resonant period. The results indicated that there were different correlations between precipitation and the dynamic weather factors at different periodic scales.

Key words: precipitation; sunspot; AO; ENSO; Qaidam Basin